

高铁混凝土氯离子现场检测试纸及便携设备研究

刘重鑫

喀什大学 新疆 喀什 844000

摘要：高铁混凝土结构长期受氯离子侵蚀，导致钢筋锈蚀、结构耐久性下降，精准检测氯离子含量是保障高铁安全运维的关键。本文针对高铁现场检测的高效性、便携性与环境适应性需求，研究了基于硝酸银-铬酸钾显色体系的氯离子比色试纸及配套便携检测设备。试纸采用定性滤纸基底与精准浸渍工艺制备，结合图像识别算法实现定量分析；便携设备集成电化学传感器、样品前处理、信号处理及人机交互模块，具备快速检测、数据数字化传输能力。研究为高铁混凝土氯离子现场检测提供了实用化技术方案。

关键词：高铁混凝土；氯离子；现场检测；比色试纸；便携设备

引言： 高铁桥梁、轨道板等核心混凝土结构长期暴露于盐雾、融雪剂等氯离子侵蚀环境中，氯离子破坏钢筋钝化膜引发电化学锈蚀，具有隐蔽性强、累积不可逆的特点，严重威胁行车安全。然而现有检测方法依赖实验室分析，难以满足高铁天窗作业时间短、检测点位多、环境工况复杂的现场需求。本文围绕高铁混凝土氯离子现场快速检测这一核心问题，分别开展比色试纸与便携检测设备研究，旨在开发操作简便、响应快速、数据可量化的现场检测技术，支撑高铁智慧运维体系建设。

1 氯离子检测技术现状与需求分析

1.1 氯离子侵蚀对高铁混凝土结构的危害

高铁混凝土结构长期暴露于户外大气、雨雪、融雪剂及沿海盐雾环境中，氯离子通过毛细渗透、扩散、吸附等方式侵入混凝土内部，是造成结构耐久性衰减的核心诱因。混凝土内部的碱性环境会在钢筋表面形成钝化膜，保护钢筋不发生锈蚀，而侵入的氯离子会破坏钝化膜的稳定性，在钢筋表面形成局部腐蚀坑，引发钢筋电化学锈蚀反应。钢筋锈蚀后会产生体积膨胀，膨胀应力会致使混凝土表层出现顺筋裂缝、剥落、掉块等病害，大幅降低混凝土结构的承载能力与整体稳定性^[1]。高铁桥梁、轨道板、支座等核心结构对安全性、稳定性要求极高，氯离子侵蚀引发的结构损伤具有隐蔽性、累积性和不可逆性，初期难以被察觉，长期侵蚀会缩短结构服役寿命，增加运维成本，严重时会影响高铁行车安全，因此精准检测混凝土氯离子含量是高铁结构运维的关键工作。

1.2 高铁现场检测的特殊需求

高铁混凝土结构运维场景特殊，对氯离子现场检测技术和设备有着区别于普通建筑工程的专属需求。首先是检测高效性需求，高铁线路跨度大、结构点位多，且线路运维存在严格的天窗作业时间限制，检测设备需具备快速检测、即时出结果的能力，缩短现场作业时长。其次是环境适应性需求，高铁沿线涵盖沿海、高寒、高温、多雨等复杂工况，检测技术需不受温湿度、风沙、盐雾等环境因素干扰，保证不同场景下检测数据稳定可靠。同时，设备需具备便携轻量化特点，适配桥梁高空、路基边坡、隧道等受限作业空间，便于工作人员携带操作。另外，需实现检测数据定量化、数字化，可实时存储、传输数据，适配高铁智慧运维管理体系，且检测操作简单，无需专业检测资质即可完成作业，降低运维人力成本。

2 氯离子现场检测试纸研究

2.1 试纸检测的基本原理

混凝土氯离子检测试纸基于化学显色反应原理实现离子浓度快速检测，核心依托氯离子与特异性显色试剂的定量反应规律完成检测。试纸基底负载的显色体系主要由硝酸银、铬酸钾等核心试剂复配而成，当混凝土提取液中的氯离子渗透至试纸反应区域后，会与硝酸银发生沉淀反应，生成难溶性氯化银白色沉淀。在铬酸钾指示剂的协同作用下，低浓度氯离子环境中试纸保持黄色底色，随着氯离子浓度升高，氯化银沉淀持续生成，试纸反应区域会逐步呈现棕红色、红褐色等梯度颜色变化。不同氯离子浓度对应差异化的显色深浅与色调状态，遵循朗伯-比尔定律，溶液中氯离子浓度与试纸显色色度呈线性相关关系。通过捕捉试纸显色特征，结合

色阶对比或光学定量算法,即可实现混凝土氯离子含量的定性判定与定量分析,该原理反应速度快、条件要求低,适配现场快速检测场景。

2.2 试纸材料筛选与配方优化

试纸检测性能的核心取决于基底材料与显色试剂配方,需通过多组试验完成材料筛选与配方优化。基底材料优先筛选吸水性均匀、渗透速度稳定、化学惰性强的特种滤纸,对比普通滤纸、尼龙膜、纤维素膜的渗透效果,最终选用孔隙均匀、吸附性适中的定性滤纸作为载体,避免试剂堆积、扩散不均影响显色效果。显色体系以硝酸银为主反应试剂,铬酸钾为指示剂,同时添加缓冲剂、稳定剂和增稠剂,规避混凝土提取液酸碱度、杂质离子的干扰^[2]。通过正交试验调整各试剂配比,优化硝酸银浓度、铬酸钾添加量、缓冲溶液 pH 值等关键参数,解决传统试纸显色模糊、色阶区分度低、易褪色的问题。

2.3 试纸制备工艺

氯离子检测试纸采用精准化浸渍涂布工艺制备,全程控制工艺参数保障试纸性能一致性。首先对筛选后的基底滤纸进行预处理,通过去离子水浸泡、恒温烘干去除滤纸内部杂质与粉尘,消除基底自带杂质对显色反应的干扰,预处理温度控制在 60℃,烘干时长 30 分钟,保证基底干燥洁净。随后配置优化后的显色试剂混合溶液,采用匀速浸渍法将滤纸完全浸入试剂溶液中,控制浸渍速度与浸渍时间,确保试剂均匀吸附于滤纸孔隙内部,避免局部试剂浓度差异。浸渍完成后,将试纸置于无尘恒温干燥箱中低温烘干,设置 45℃ 恒温烘干,防止高温导致试剂分解失效。最后对烘干后的试纸进行裁切、封装,统一裁切为标准规格,采用避光密封包装隔绝空气与水汽,完成试纸制备,全程严控工艺误差,保证每批次试纸显色性能、响应速度保持一致。

2.4 试纸性能测试

为验证自制氯离子检测试纸的实用性与可靠性,针对核心性能指标开展系统性测试,涵盖灵敏度、精确度、重复性、抗干扰性与储存稳定性五大维度。配置不同浓度的标准氯离子溶液,模拟混凝土实际提取液环境,采用试纸进行检测试验,记录不同浓度下的显色效果,验证试纸的检测灵敏度与量程范围。通过多组平行试验,对比同批次、不同批次试纸的检测结果,分析数据偏差,验证试纸检测重复性。模拟混凝土提取液中常见的硫酸根、钙离子、镁离子等干扰离子,开展抗干扰试验,检测杂质离子对显色结果的影响。同时进行高低

温老化试验,测试试纸在不同储存条件下的性能衰减情况,验证储存稳定性。将试纸检测数据与实验室滴定法标准数据对比,校验检测精确度,确保试纸满足高铁现场检测的基础性能要求。

2.5 试纸量化方法

传统试纸仅能实现氯离子定性检测,为提升检测精度,建立基于图像识别的试纸量化检测方法。依托光学成像设备采集试纸显色区域图像,通过图像处理技术完成图像降噪、区域裁剪、色彩校正,消除光照、拍摄角度等外界因素对图像色彩的干扰。提取显色区域的 RGB、HSV 色彩特征参数,结合标准氯离子浓度梯度显色样本,构建色彩参数与氯离子浓度的线性拟合模型。通过拟合算法修正数据偏差,建立标准化定量计算公式,实现根据试纸显色色度精准换算氯离子浓度。同时搭建配套的色阶数据库,录入不同浓度对应的显色特征,优化算法精度,降低人为读数误差。该量化方法无需复杂设备,可快速完成数据采集与分析,解决了传统试纸只能粗略判断浓度范围的短板,适配高铁现场快速定量检测需求。

3 高铁混凝土氯离子现场检测便携设备研究

3.1 设备总体设计方案

结合高铁混凝土现场检测的便携、快速、精准需求,采用模块化集成思路完成便携检测设备总体设计,整体设备遵循轻量化、一体化、抗干扰的设计原则。设备整体分为五大核心功能模块与电源管理模块,分别为电化学传感器检测模块、样品前处理模块、信号采集与处理模块、人机交互输出模块、电源管理模块,各模块独立运行且协同配合,缩减设备体积与重量^[3]。整体机身采用紧凑型结构设计,选用轻质高强度外壳材质,适配户外复杂作业环境。设备工作流程为:通过样品前处理模块完成混凝土粉末样品的溶解、过滤、稀释,制备检测液,再由电化学传感器采集离子浓度信号,经信号处理模块放大、滤波、运算后,将检测结果传输至人机交互模块完成显示、存储与导出。整体设计兼顾检测精度、便携性与稳定性,完全适配高铁天窗快速作业场景。

3.2 电化学传感器模块

电化学传感器模块是设备的核心检测单元,直接决定氯离子浓度检测的精准度,采用氯离子选择性电极作为核心感应元件。传感器由感应膜、内参比溶液、参比电极三部分组成,感应膜可特异性响应溶液中的氯离子,根据能斯特方程,电极电位会随检测液氯离子活

度变化产生线性电势信号。为适配高铁现场复杂样品环境,对传感器进行抗干扰优化,增设离子屏蔽膜,有效阻隔硫酸根、碳酸氢根等干扰离子的影响,降低检测误差。传感器采用嵌入式安装方式,与设备检测腔体精准匹配,密封性良好,可防止检测液渗漏影响设备运行。通过标定试验建立电势信号与氯离子浓度的对应关系,校准传感器检测精度,保障不同温度、湿度工况下检测数据的稳定性与准确性。

3.3 样品前处理模块

混凝土样品成分复杂,含砂石、胶凝材料等杂质,需通过专用前处理模块完成样品制备,为精准检测提供合格检测液。该模块集成取样研磨、溶解搅拌、过滤净化、定量稀释四大功能,适配现场原位样品处理需求。模块配备小型便携式研磨组件,可快速将现场采集的混凝土表层及内部粉末样品研磨至标准细度,保证样品溶解性均匀。内置恒温搅拌装置,可精准控制溶解温度与搅拌时长,促使样品中氯离子充分溶出,规避溶出不完全导致的检测偏差。搭配微型精密过滤组件,可快速过滤样品溶液中的固体杂质、悬浮颗粒,获取澄清检测液。同时设置定量配比装置,可根据检测需求自动完成溶液稀释配比,无需人工操作,简化现场作业流程,解决传统前处理步骤繁琐、耗时久、误差大的痛点,适配高铁快速检测作业。

3.4 信号采集与处理模块

信号采集与处理模块承担传感器信号接收、优化、运算的核心作用,是实现数据精准输出的关键。模块采用高精度信号采集芯片,实时采集传感器输出的微弱电势模拟信号,针对现场环境电磁干扰、信号噪声问题,内置多级滤波电路,有效过滤高频杂波与干扰信号,提升信号纯度。通过模数转换单元将模拟信号转化为数字信号,传输至核心主控芯片进行运算处理。主控芯片内置校准算法与温度补偿模型,可根据现场环境温度变化自动修正检测数据,消除温度对电化学检测的影响。同时搭载数据降噪、偏差修正程序,对异常数据进行筛选剔除,保障数据稳定性。模块具备高速数据处理能力,可实现毫秒级信号采集与运算,快速输出检测结果。

3.5 人机交互与输出模块

人机交互与输出模块是设备的操作与数据展示终端,兼顾操作便捷性与数据可视化需求,适配现场工作人员快速上手操作。模块搭载高清触控显示屏,支持全中文可视化操作界面,集成参数设置、样品录入、检测启动、数据查看等功能,操作流程简洁直观,无需专业技术培训即可完成作业。设备实时显示检测过程、

环境温度、检测进度及最终氯离子浓度数据,同时支持数据一键保存、历史记录查询、数据批量导出功能。为适配高铁智慧运维需求,模块预留数据传输接口,可通过有线或无线方式将检测数据上传至运维管理平台。另外,增设异常预警功能,当检测氯离子浓度超出安全阈值时,设备自动弹窗提示预警,便于工作人员及时判断结构病害风险,提升运维检测的智能化水平。

3.6 电源管理

电源管理模块为设备全工况稳定运行提供电力保障,适配高铁户外无固定电源的作业场景。模块采用大容量可充电锂电池作为核心供电单元,具备高续航、耐高低温特性,可适应-20℃至60℃的户外工况,满足全天候现场检测作业需求。搭载智能电源管理芯片,实现多路独立供电调控,针对传感器、处理模块、显示屏等不同单元匹配适配电压,避免电压波动影响设备精度^[4]。模块集成过充、过放、过流、短路四重保护功能,有效规避户外复杂环境下的用电安全隐患,提升设备运行安全性。同时配备快充接口与电量实时显示功能,支持作业中实时查看剩余电量,低电量自动提醒充电。此外,设置待机休眠模式,设备闲置时自动降低功耗,有效延长续航时长,完全适配高铁野外、天窗短时高频的检测作业模式。

结束语

本文围绕高铁混凝土氯离子现场检测需求,系统研究了比色试纸与便携检测设备两类技术方案。试纸基于 $\text{AgNO}_3\text{-K}_2\text{CrO}_4$ 显色体系,配合图像识别算法实现定量检测;便携设备以氯离子选择性电极为核心,集成样品前处理、信号处理与人机交互模块,满足天窗快速作业要求。研究表明,两类方案均具备检测快速、操作简便、数据可数字化传输的优势,可有效支撑高铁混凝土结构氯离子含量的现场精准检测。后续需进一步开展多工况实桥验证,优化算法精度与设备耐久性。

参考文献

- [1] 黎永康,李云兰.基于混凝土原材料的氯离子检测方法探析[J].科技资讯,2025,23(16):102-104.
- [2] 王永富.钢纤维混凝土耐久性检测中氯离子渗透性能试验分析[J].砖瓦,2025,(10):69-71.
- [3] 梁可,郭明磊,吕忠.混凝土抗氯离子渗透性能测试方法研究进展[J].中国材料进展,2026,45(4):340-350.
- [4] 郝向炜,邢键,马嘉强,等.基于多光谱反射法的泥浆-混凝土分界自动检测仪[J].光谱学与光谱分析,2025,45(10):2978-2982.